

**Гідрравлічний радіус** застосовується в гідравліці для оцінки опору і розрахунку каналів некруглої форми. Проведена оцінка допустимості використання гідравлічного радіусу для розрахунку опору течії неньютонівських рідин в каналах некруглого поперечного перерізу і визначення їх реологічних характеристик

**Ключові слова:** поліетилен, гідравлічний радіус, крива течії

**Гидравлический радиус** используется в гидравлике для оценки сопротивления и расчета каналов некруглой формы. Проведена оценка допустимости использования гидравлического радиуса для расчета течения неньютоновских жидкостей в каналах некруглого поперечного сечения и определение их реологических характеристик

**Ключевые слова:** полиэтилен, гидравлический радиус, кривая течения

**Hydraulic radius** is used in hydraulics for estimation of resistance and calculation of nonround-form channels. The estimation of acceptability of use of hydraulic radius for calculation of non-Newtonian liquids flow in nonround-form channels and determination of their rheological characteristics was realized

**Keywords:** polyethylene, hydraulic radius, flow curve

УДК 678.057

# ІНВАРІАНТНИЙ ВИД КРИВОЇ ТЕЧІЇ ПЕВГ ВІДНОСНО ГІДРАВЛІЧНОГО РАДІУСУ КАНАЛУ

**В.І.Сівецький**

Кандидат технічних наук, професор  
Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування\*  
Контактний тел.: (044) 454-92-77, 050-440-98-95

**Д.Д.Рябінін**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки\*  
Контактний тел.: 096-440-22-32

**О.Л.Сокольський**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування\*  
Контактний тел.: (044) 454-92-77, 066-218-64-76  
E-mail: sokolkiev@ukr.net

**В.М.Волинець**

Студент  
\*Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”  
пр. Перемоги 37, корпус 19, м. Київ, 03056  
Контактний тел.: 099-433-88-91

## Постановка проблеми

Питання про використання поняття гідравлічного радіусу, як адекватного способу переходу від циліндричних каналів некруглого поперечного перерізу до круглих каналів при течії неньютонівських рідин, зокрема розплавів полімерів, являє значний практичний інтерес у зв'язку із розповсюдженням таких каналів у обладнанні для отримання виробів із полімерів та устаткуванні для інших процесів хімічної технології.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

При гідравлічному розрахунку некруглих каналів гідравлічний опір циліндричних або призматичних каналів складного профілю визначають шляхом порівняння опору цих каналів з еквівалентною їм за опором трубою круглого поперечного перерізу, у якій за радіус

приймається «гідравлічний радіус»  $R_r$ , який дорівнює відношенню площі нормального перерізу  $S$  каналу до змоченого периметру  $\chi$  [1,4]:

$$R_r = \frac{S}{\chi}. \quad (1)$$

Якщо використати поняття гідравлічного радіусу, то середнє за периметром напруження тертя або, інакше, напруження зсуву на стінці каналу

$$\tau_r = \frac{\Delta P \cdot R_r}{L}, \quad (2)$$

тобто середнє за периметром циліндричного (призматичного) каналу напруження тертя дорівнює перепаду тиску  $\Delta P$  на ділянці каналу довжиною  $L$  і пропорційно гідравлічному радіусу.

Рівняння (2) можна використовувати для будь-яких суцільних середовищ, які рухаються у циліндричних каналах, зокрема, при русі неньютонівських рідин [1].

У реології неньютонівських рідин величина  $\tau_R$  використовується для побудови кривої течії, яка є графічним виразом залежності  $\tau_R = f(\Gamma_R)$ . При цьому величина ефективного градієнту швидкості може бути обчислена за формулою

$$\Gamma_R = \frac{Q}{2\pi R_R^2}, \quad (3)$$

де  $Q$  – об'ємні витрати.

При використанні гідравлічного радіусу необхідно враховувати, що цей спосіб має сенс тільки у тому випадку, якщо у каналів, які порівнюються за опором, перерізи геометрично близькі один до одного [1].

Відповідно доцільною є оцінка можливості використання поняття гідравлічного радіусу для розрахунку течії неньютонівських рідин у каналах некруглого поперечного перерізу та визначення їх реологічних характеристик.

Для каналів з прямокутним поперечним перерізом в роботі [1] встановлено неінваріантність кривих течії розплавів полімерів відносно гідравлічного радіусу каналу, отримані співвідношення, які дозволяють визначити уточнений радіус каналу  $R_R$ , який умовно названо реологічним.

### Формулювання цілей статті

Метою статті є виявлення особливостей викладення алгоритму розв'язання задачі зведення кривих течії полімерів, неінваріантних відносно гідравлічного радіусу каналу, до інваріантного виду і розповсюдження його на течію різних полімерів, які по різному поведуть себе за умов деформування у каналах.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Експериментальні дослідження течії неньютонівської рідини в каналах прямокутного перерізу, сумірних із промисловими, здійснювали в використанні змінних каналів.

Для дослідження був використаний модифікований віскозиметр сталих швидкостей, який дозволяє реалізувати усталений потік розплавів полімерів у широкому діапазоні зміни швидкостей течії у каналах із геометрією та розмірами, які фактично використовуються у конструкціях головок черв'ячних машин [1].

Для віскозиметричних досліджень зазвичай використовують круглі канали. Якщо неньютонівська рідина не виявляє пристінних ефектів, то криві течії, які були отримані на круглих каналах різних діаметрів, накладаються одна на одну і практично є інваріантними відносно діаметру каналу.

З цієї точки зору, використання поняття гідравлічного радіусу для розрахунку каналів із перерізом некруглої форми повинно було б забезпечити інваріантність їх реологічних характеристик відносно величини гідравлічного радіусу каналу.

Перевірка цього положення була здійснена для типової неньютонівської рідини, зокрема, розплаву поліетилену низької густини марки П-2010-В за температур 150°C та 190°C. Розплав цього поліетилену є свого

роду еталонним матеріалом, особливості реологічної поведінки якого достатньо відомі та описані у літературі [1]. Він поводить себе як типова неньютонівська рідина, що підкоряється степеневому закону. Криві течії розплаву цього полімеру інваріантні відносно діаметру каналу. Для нього не характерна аномальна реологічна поведінка на межі зі стінкою каналу або в об'ємних шарах потоку. У той же час, для нього установлена неоднорідність розподілу напружень у потоці розплаву при його течії у прямокутному каналі [1].

Значення величини гідравлічних радіусів були визначені за формулою (1). За формулами (2) і (3) для вищевказаних у табл. 1 каналів були визначені консистентні криві течії, побудовані у консистентних змінних Рейнера. Слід відмітити, що у реологічному аспекті [1] консистентна змінна  $\tau_{Ri}$  повинна бути однозначною функцією консистентної змінної  $\Gamma_{Ri}$ . І цю залежність можна застосувати до течії рідини крізь будь-який канал будь-якого перерізу [1].

Консистентні криві течії мають яскраво виражену неінваріантність відносно гідравлічного радіусу каналу, яку неможливо пояснити особливостями поведінки еталонного матеріалу у пристінному шарі або у об'ємних шарах потоку. Тобто поняття гідравлічного радіусу не дає змоги отримати для каналів прямокутної форми величини  $\tau_{Ri}$  і  $\Gamma_{Ri}$ , які б забезпечили інваріантність консистентних кривих течії відносно геометричних розмірів каналів, тобто  $\tau_{Ri}$  не є однозначною функцією  $\Gamma_{Ri}$ . Розв'язання цієї задачі запропоновано у роботі [1] і полягає у визначенні геометричного параметру каналу, який би також залежав і від реологічних характеристик полімеру. Таким параметром може бути радіус каналу  $R_R$ , який умовно можна назвати реологічним.

Реологічний радіус  $R_{Ri \times 32}$  для  $i$ -го каналу можна визначити із рівняння:

$$R_{Ri \times 32} = R_{\Gamma i \times 32} \sqrt[3n]{\frac{\tau_{\chi}}{\tau_{R_{\Gamma i \times 32}}}}, \quad (4)$$

де  $R_{\Gamma i \times 32}$  – гідравлічний радіус  $i$ -го каналу;  
 $n = \frac{d \ln \tau_{R_{i \times 32}}}{d \ln \Gamma_{R_{i \times 32}}}$  – логарифмічна похідна або тангенс кута

нахилу логарифмічних кривих напруження зсуву на стінці каналу від ефективного градієнту швидкості;  $\tau_{\chi}$  – напруження зсуву, яке відповідає  $\Gamma_{R_{i \times 32}}$  на кривій течії каналу  $2 \times 32$ ;  $\tau_{R_{i \times 32}}$  – напруження зсуву  $i$ -го каналу.

Використовуючи отримані дані, розглянемо задачу визначення положення розрахункових даних кривої течії  $i$ -го каналу на кривій течії каналу  $2 \times 32$  на базі таких вихідних величин: консистентних кривих течії  $i$ -го  $2 \times 32$ , об'ємної витрати  $Q$ , довжини гідравлічних  $R_{\Gamma i \times 32}$  та реологічних  $R_{R_{i \times 32}}$  радіусів  $i$ -го каналу.

Порядок розв'язання задачі такий.

1. За формулою (3) визначаємо ефективний градієнт швидкості:

$$\Gamma_{R_{i \times 32}} = \frac{Q}{2\pi R_{\Gamma i \times 32}^2}.$$

2. По кривій течії для каналу  $2 \times 32$  визначаємо величину напруження зсуву  $\tau_{\chi}$ .

3. Враховуючи, що  $\tau_{R_{\Gamma \times 32}} = \tau_{R_{R \times 32}}$ ,

використовуємо рівняння (4) для визначення напруження зсуву на стінці каналу 2×32:

$$\tau_{R_{\Gamma \times 32}} = \tau_x \left( \frac{R_{\Gamma \times 32}}{R_{R \times 32}} \right)^{3n}$$

4. За допомогою кривої течії для каналу 2×32 знаходимо величину  $\Gamma_{R_{\times 32}}$  і перевіряємо її величину за формулою роботи [1]:

$$\Gamma_{R_{\times 32}} = \Gamma_{R_{\Gamma \times 32}} \sqrt[n]{\frac{\tau_{R_{\Gamma \times 32}}}{\tau_x}}$$

Величини  $\tau_{R_{\Gamma \times 32}} = \tau_{R_{R \times 32}}$  та  $\Gamma_{R_{\times 32}}$  належать до

кривої течії каналу 2×32 і характеризують напружений стан  $i$ -го каналу. Внаслідок чого криві течії розплавів полімерів, що рухаються у прямокутних каналах, стають інваріантними відносно розмірів поперечного перерізу каналу.

В таблиці 1 наведені розрахункові дані для зведення кривої течії розплаву поліетилену високої густини (ПЕВГ), неінваріантної відносно гідравлічного радіуса каналу 4×32, до інваріантного виду.

Параметри течії поліетилену високої густини марки П-4020-ЭК у каналі 4×32 за температури  $T=210^{\circ}\text{C}$

Гідравлічний радіус, $R_{\Gamma \times 32}$ , см	Реологічний радіус, $R_{R \times 32}$ , см	$\tau_{R_{\times 32}}$ , Н/см <sup>2</sup>	$\tau_x$ , Н/см <sup>2</sup>	$\Gamma_{R_{\times 32}}$ , с <sup>-1</sup>	$\Gamma_{R_{\Gamma \times 32}}$ , с <sup>-1</sup>	n
0,176	0,1496	0,865	0,7	5,4	7,79	0,5774
0,176	0,1489	1,06	0,84	7,2	10,77	0,5774
0,176	0,1469	1,425	1,18	14	19,47	0,5774
0,176	0,1477	1,97	1,6	26	40,53	0,4663
0,176	0,1471	2,45	1,97	40	63,88	0,4663
0,176	0,144	3,45	2,7	78	131,98	0,4663
0,176	0,1425	4,45	3,4	130	231,92	0,4663
0,176	0,139	8,2	6	450	879,75	0,4663
0,176	0,139	13,5	9,4	1200	2607,6	0,4663

На рис. 1 суцільними лініями показані консистентні криві течії для каналів 2×32 та 4×32, отримані в результаті дослідів, та розрахункові дані.

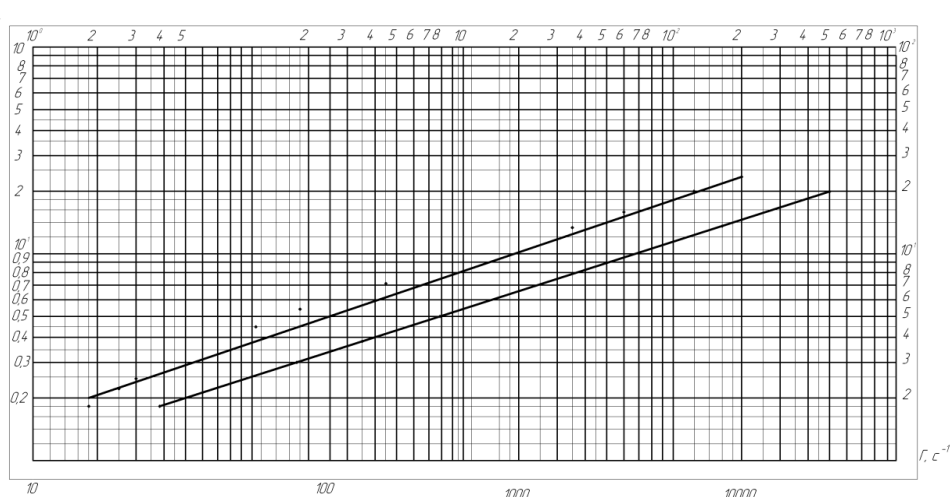


Рис. 1. Консистентні криві течії ПЕВГ марки П-4020-ЭК для каналів 2×32 та 4×32 за температури  $210^{\circ}\text{C}$ : криві течії — суцільні лінії; розрахункові дані -  $\diamond$

## Висновки

Поняття гідравлічного радіуса каналів некруглого перерізу при течії неньютонівської рідини не дає змоги отримати величини  $\tau_{R_{\Gamma}}$  та  $\Gamma_{R_{\Gamma}}$ , які забезпечили б інваріантність консистентних кривих течії відносно геометричних розмірів каналу. Тоді як використання поняття реологічного радіуса дає змогу побудови кривих течії полімерів в каналах довільного перерізу за наявності таких експериментальних даних хоча б для одного модельного каналу. Напрямок подальших досліджень може бути розповсюдження розрахунків на різні типи полімерів і умови течії.

Таблиця 1

## Література

1. Сівецький, В.І. Пристинні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів [Текст] / В.І. Сівецький, О.С. Сахаров, О.Л. Сокольський, Д.Д. Рябінін. — К.: НТУУ «КПІ», 2009. — 140 с.